# مدل‌سازی عددی خاک دانه‌ای به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی در بستر راه*

«یادداشت پژوهشی»

وحید نظامی[۱] سعید خرقانی[۲] نیما مهران نیا[۳]

**چکیده** *روش بیولوژیکی روشی غیرمعمول برای پایدار سازی خاک می‌باشد که در علم مهندسی عمران و به‌خصوص در بخش‌های مربـوط به‌راه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. رسوب میکروبی سنگ آهک در نتیجهٔ هیدرولیز اوره توسط یک نوع آنزیم به نـام اوره آز مـی‌باشـد. به‌واسطهٔ این واکنش، pH خاک افزایش می‌یابد و کریستال‌های سنگ آهک روی ذرات و بین حفرات خاک رسوب می‌کند و منجـر بـه اتصـال دانه‌های خاک به یکدیگر و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. در این تحقیق بااستفاده‌از نتـایج آزمایشـگاهی کـه در پژوهشـگاه ملـی مهندسـی ژنتیک و زیست فناوری انجام شده است، به کمک نرم‌افزار آباکوس ۶،۱۱ بستر یک راه به‌سازی شدهٔ ماسه به‌روش بیولوژیکی، مدل‌سازی شده است. لایهٔ خاک مورد نظر در حالت الاستو پلاستیک مدل‌سازی شده است و مقادیر نشست بااستفاده‌از مدل الاستو پلاستیک در ضـخامت‌هـای مختلف تثبیت‌شده محاسبه شده است و نتایج به‌دست آمده نشان از تأثیر قابل توجه به‌سازی خاک به‌روش بیولوژیکی در کـاهش تغییـر شـکل پلاستیک خاک دارد.*

**واژه‌های کلیدی** خاک دانه‌ای، به‌سازی بیولوژیکی، سنگ آهک، مدل‌سازی عددی، رفتار الاستو پلاستیک.

# Numerical Modeling of Granular Soil Stabilized Using Biological Approach in Road Substrate

V. Nezami S. Kharaghani N. Mehrannia

**Abstract** *Biological method is an unusual way for soil stabilization in civil engineering, particularly in the sectors of road. Microbial limestone deposits occur due to urea hydrolysis by an enzyme called urease. Through this reaction, PH of the soil increases and Crystals of limestone deposit between soil particles and reduce the permeability of soil. In this study, by using experimental results at the National Institute for Genetic Engineering and Biotechnology, a road improved sandy bed is modeled by biological methods. ABAQUS 6.11 in this study is used. The soil layer is modeled in elasto-plastic condition and Settlement is calculated by using elasto plastic model in various thicknesses. The results show a significant effect in reducing plastic deformation and increasing soil strength by using biological methods in soil improvement.*

**Key Words** Granular Soils, Biological Soil Improvement, Limestone, Numerical Modeling, The Behavior of Elasto Plastic

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۰/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۵/۱۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی. Email: Vahid1162@yahoo.com

(۳) دانشجوی دکتری مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

## مقدمه

ماسهٔ ریزدانهٔ یکنواخت (sp) از جمله خاک‌هایی است که ظرفیت لازم برای ساخت روسازی راه را ندارد و ممکن است سیستم را ازنظر عملکردی با خطرات جدی مواجه سازد. بنابراین مهندسان به فکر روش‌هایی برای بهبود خواص خاک بودند که حاصل آن ایجاد روش‌های مختلف به‌سازی خاک می‌باشد. روش بیولوژیکی (Biological Process) روشی غیرمعمول برای پایدارسازی خاک می‌باشد که در علم مهندسی عمران و به‌خصوص در بخش‌های مربوط به راه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش مذکور رسوب میکروبی سنگ آهک مقاومت و سختی خاک ماسه‌ای را افزایش می‌دهد و این یکی از مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌هایی است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان شیمیایی در بسیاری از پروژه‌های به‌سازی باشد. رسوب میکروبی سنگ آهک در نتیجهٔ هیدرولیز اوره (Urea Hydrolysis) توسط آنزیم اوره آز ترشح‌شده از میکرو ارگانیزم (Microorganism)ها می‌باشد. به‌واسطهٔ این واکنش آنزیمی، PH افزایش می‌یابد و کریستال سنگ آهک روی سطح دانه‌های ماسه و بین حفرات آن رسوب می‌کند و نهایتا منجر به اتصال دانه‌ها به یکدیگر و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود [1]. اولین بار هیدرولیز اوره توسط فرایندی در اواخر قرن نوزدهم توسط رسوب القایی میکروبی کربناتی (Microbially Induced Carbonate Precipitation) به‌وجود آمد [2, 3]. اگرچه اکنون به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین منبع تولید کربنات توسط موجودات زنده تلقی می‌شود، اما به‌واسطهٔ فراوانی اوره، توجه به این فرایند در اواخر قرن بیستم برای کاربردهای صنعتی از قبیل مرمت و بازسازی مواد ساخته‌شده از سنگ آهگ [4, 5]، احیای بیولوژیک [6 ،7]، مقاوم‌سازی بتن [8] و تصفیهٔ فاضلاب [9]، افزایش یافت. بیشتر مطالعات روی به‌سازی بیولوژیک خاک بر پایهٔ هیدرولیز اوره است. در هیدرولیز اوره از میکروارگانیزم‌هایی که آنزیم اوره آز تولید می‌کند، همانند اسپوروسارسینا پاستوری، استفاده می‌شود. این میکرو ارگانیزم در آزمایشگاه رشد داده می‌شود [1] و همراه با محلولی از اوره و کلرید کلسیم ( Calcium Chloride) به خاک وارد می‌شود. در واکنش زیر که فرایند هیدرولیز اوره است، اوره آز تولیدشده توسط میکروب فرایند را کاتالیز می‌کند که به‌ترتیب محصول آن آمونیوم و کربنات می‌باشد.

$$CO(NH_2)2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{-2} \quad (۱)$$

| | |
|---|---|
| $CO(NH_2)2$ | اوره |
| $H_2O$ | آب |
| NH4+ | آمونیوم |
| $CO_3^{-2}$ | کربنات |

یون کربنات تولیدشده در حضور یون کلسیم به‌صورت کریستال‌های کربنات کلسیم رسوب می‌کند و یک پل سیمانی بین دانه‌های ماسه ایجاد می‌شود.

$$Ca^{2+} + CO_۳^{۲-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow \quad (۲)$$

وایفن(۲۰۰۷) (Whiffin) به‌منظور ارزیابی پتانسیل رسوب میکروبی کربنات کلسیم به‌عنوان روشی برای به‌سازی خاک، ستون ماسه‌ای ۵متری را توسط باکتری و واکنشگرهای مورد نیاز آماده نمود. پس از پایان تزریق برای ارزیابی میزان تغییر در خواص مکانیکی خاک، قطعاتی از ستون، تحت آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافتهٔ زهکشی‌نشده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از این بود که بهبود قابل ملاحظه‌ای در خواص مکانیکی خاک به‌سازی‌شده همچون مدول الاستیسیته و مقاومت برشی به‌وجود آمده است و میزان حداقل محتوای کربنات کلسیم به‌اندازهٔ ٦٠ کیلوگرم در هر مترمکعب برای رسیدن به افزایش قابل توجه مقاومت مورد نیاز است. این محقق به افزایش سختی حدودا ۲۰۰ برابری در ماسهٔ تثبیت‌شده به‌روش بیولوژیکی، اشاره کرده است.

دجانگ (Dejong) (۲۰۰٦) برای ارزیابی

سمنتاسیون، یک نمونه ماسهٔ سست، یک نمونه ماسهٔ به‌سازی‌شده توسط ۵ درصد گچ و یک نمونه ماسهٔ به‌سازی‌شده توسط رسوب القایی سنگ آهک (سیمان بیولوژیک) را با انجام آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافتهٔ زهکشی‌نشده مقایسه نمود و به‌منظور پایش فرایند سمنتاسیون و همچنین شیوه‌ای برای درک بهتر رفتار مواد در حین آزمون سه‌محوری، سرعت موج برشی را در زمان‌های مختلف سمنتاسیون سنجش کرد.

در این تحقیق نتیجه‌گیری شد که ماسهٔ شل پس از ۰,۱۵٪ کرنش دچار شکست می‌شود. مقاومت نمونهٔ به‌سازی‌شده توسط گچ حدودا ۳ برابر و مقاومت نمونهٔ به‌سازی‌شده به‌روش بیولوژیکی حدودا ٤ برابر نسبت به ماسهٔ به‌سازی‌نشده افزایش یافت. باتوجه به رفتار ماسهٔ به‌سازی‌شده به‌وضوح می‌توان مؤثر بودن روش میکروبی را دریافت و مشاهده می‌شود که مقاومت بیشتری نسبت به دو نمونهٔ دیگر دارد.

دجانگ (۲۰۰۹) برای به‌سازی بیولوژیکی، آزمایشی در مقیاس بزرگ انجام داد. در این آزمایش یک پی سطحی مدل‌سازی شد و توسط آزمون بارگذاری صفحه‌ای (Plate Load Test) و تکنیک سرعت موج برشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درصورت تثبیت خاک به‌روش بیولوژیکی نشست پی ۵ برابر کاهش می‌یابد.

از آنجا که هیچ مدل‌سازی عددی بر روی نمونهٔ به‌سازی‌شده به‌روش بیولوژیکی در بستر یک راه صورت نگرفته است، و بررسی چگونگی تغییرات تنش و کرنش قبل و بعد از به‌سازی بیولوژیکی نسبت به بارهای وارد از سوی چرخ خودروها حائز اهمیت می‌باشد، در این تحقیق بااستفاده‌از نتایج آزمایشگاهی نمونه خاک ماسه‌ای به‌سازی‌شده به‌روش میکروبی توسط بدیعی (۱۳۹۰)، بااستفاده‌از نرم‌افزار ABAQUS6.11 مدل‌سازی عددی انجام شده است. در این تحقیق با بررسی تنش‌ها و نشست‌ها در بستر به‌سازی‌شده، عمق بهینهٔ به‌سازی خاک برای تزریق محلول باکتریایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای تعیین عمر بستر روسازی، تعداد تکرار مجاز بارگذاری از آیین‌نامهٔ کشورهای آمریکا، انگلستان و بلژیک به‌دست آمده است.

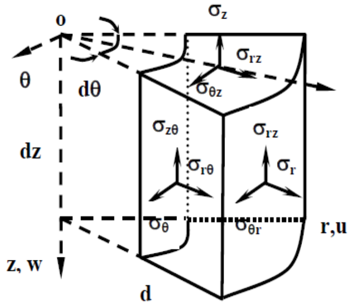
## مواد و روش‌ها

روش اجزای محدود یا روش المان‌های محدود (Finite Element Method (FEM)) روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل و جزئی نیز حل و انتگرال‌ها است. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل است یا ساده‌سازی آنهاست به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند. از آنجایی که انجام آزمایش‌ها عملی بسیار پرهزینه است، استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تکمیلی به‌کار برده شود.

نرم‌افزار آباکوس به‌منظور محاسبهٔ مقادیر تنش و کرنش در عمق‌های مختلف بستر به‌کار گرفته شده است. در این مدل‌سازی از مدل رفتاری دراگر پراگر(DP) (Drucker-Prager) استفاده شده است [11]. در این روش بستر راه تحت تأثیر بار وارد بر روی یک سطح مقطع دایره‌ای شکل قرار گرفته و مقادیر تنش، تغییر مکان و تغییر شکل نسبی نقاط مختلف یک تودهٔ یک لایه‌ای نیمه‌بینهایت را در حالت دوبعدی تعیین می‌نماید. در این مدل‌سازی، فرض بر آن است که مصالح همگن، ایزوتروپ هستند و سازه در یک سیستم متقارن دورانی تحلیل شده است. بنابراین باتوجه به شکل(۱) از سیستم مختصات استوانه‌ای در این مدل استفاده شده است.

فرمولاسیون مورد استفاده در این مدل‌سازی با رویکرد تقارن محوری (Axisymmetric) در مختصات استوانه‌ای (r, ө , z) است. بااستفاده‌از مدل‌های تقارن محوری در شرایطی که بارگذاری و خواص مصالح مستقل ازجهت المان‌ها (زاویهٔ ө ) باشد، می‌توان از این

تکنیک مدل‌سازی بهره برد. در این مدل فرض بر آن است که خواص مصالح در صفحهٔ افقی ثابت و بارگذاری سیستم روی یک سطح دایره‌ای و به‌صورت یکنواخت اعمال می‌گردد. لازم به توضیح است که سطح تماس لاستیک خودرو با خاک دایره‌ای فرض شده است. فرض دایره‌ای بودن محل اثر بار، باعث ساده‌تر شدن محاسبات شده و استفاده از سیستم مختصات استوانه‌ای را ممکن ساخته است. درنتیجه مسائل به‌کمک سیستم محورهای متقارن قابل تحلیل می‌باشند.



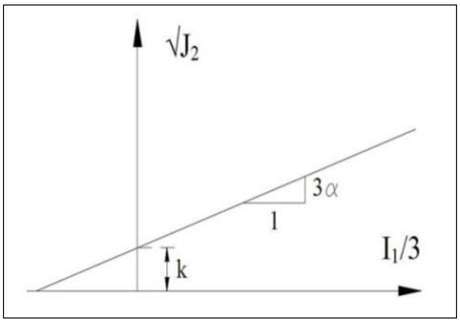
شکل ۱ سیستم مختصات استوانه‌ای

در این تحقیق بار وارد براساس آئین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران انتخاب شده است [۱۲]. در این آئین‌نامه محور مبنا، یک محور تک‌چرخ ۸۰ کیلونیوتنی است که سطح اثر هر چرخ دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و تنش آن ۵۷۰ کیلوپاسکال است.

در این مدل‌سازی رفتار مصالح الاستوپلاستیک کامل (مدل دراگر- پراگر) درنظر گرفته شده است. مقاومت مصالح دانه‌ای به شرایط اعمال تنش محصورکننده بستگی دارد و با افزایش آن، مقاومت مصالح نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در مدل دراگر- پراگر رفتار مصالح به‌صورت سخت‌شونده درنظر گرفته شده است. معیار خرابی دراگر- پراگر با درنظر گرفتن اثر فشار هیدرو استاتیک مطابق رابطهٔ (۳) می‌باشد:

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha . I_1 - K = 0 \qquad (۳)$$

در این رابطه f تابع تسلیم معیار دراگر- پراگر، پارامترهای α و K به‌ترتیب به زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بستگی دارد. I اولین ثابت تنش‌های اصلی است و $J_2$ دومین ثابت تنش انحرافی است.



شکل ۲ سطح گسیختگی مدل دراگر- پراگر در فضای دوبعدی

همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، از سطح گسیختگی مدل دراگر- پراگر دو رفتار متصور خواهد بود:

اگر $f < 0$ : مصالح به‌صورت الاستیک رفتار خواهند کرد.

اگر $f = 0$ : مصالح به‌صورت الاستو- پلاستیک رفتار خواهند کرد (معیار دراگر- پراگر).

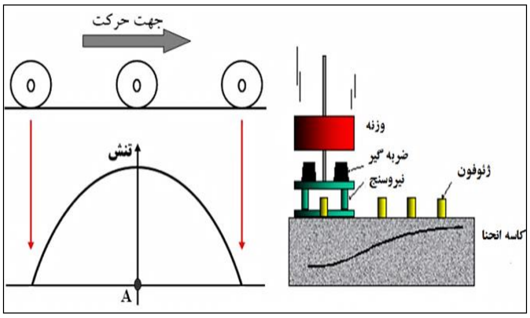
در جدول (۱) مشخصات مصالح مورد استفاده در پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری توسط بدیعی(۱۳۹۰) به‌دست آمده است که مربوط به ماسهٔ ریزدانه با دانه‌بندی یکنواخت (SP) از ساحل چالوس است. این جدول شامل چسبندگی(c)، مدول الاستیسیته(E)، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (φ) و ضریب پواسون (υ) می‌باشد [۱۰].

بارگذاری شامل یک سطح دایره‌ای با شعاع ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد که به‌صورت نیمه‌سینوسی با فرکانس ۲۵ هرتز و در مدت زمان ۲۰ میلی‌ثانیه در سطوح مختلف تنش به مدل اعمال می‌گردد. مکانیزم اعمال بار از چرخ وسیلهٔ نقلیه به یک نقطه از روسازی یکنواخت نیست و به‌صورت یک تابع نیمه‌سینوسی تغییر می‌کند.

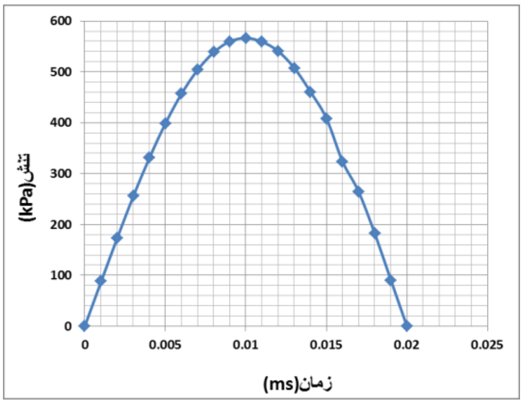
حداکثر مقدار تنش زمانی اتفاق می‌افتد که چرخ وسیلهٔ نقلیه دقیقا روی همان نقطه قرار گیرد [۱۲]. شکل (۳) چگونگی توزیع بار سینوسی و شکل (٤) نحوهٔ اعمال بارگذاری را بر روی روسازی نشان می‌دهد. شرایط مرزی به گونه‌ای اعمال شده است که انتهای مدل فاقد هرگونه درج آزادی باشد و تنها در راستای قائم امکان جابه‌جایی وجود داشته باشد.

جدول ۱ پارامترهای مدل رفتاری خاک

| مدل | مشخصات خاک | | | |
|---|---|---|---|---|
| | E (MPa) | C (kPa) | φº | υ |
| قبل از بهسازی | ٤٠ | ١ | ٣٧ | ٠,٣ |
| بعد از بهسازی | ٩٣٤٠ | ٤٥٥ | ٤٢ | ٠,٣ |




شکل ۳ روش توزیع بار سینوسی



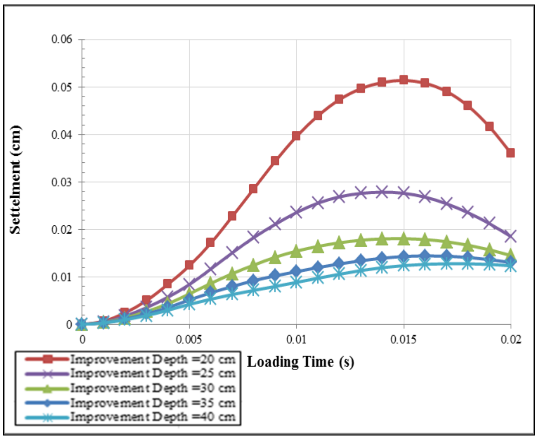

شکل ٤ نحوهٔ اعمال بارگذاری

## عملیات تزریق محلول باکتریایی به خاک

برای جانمایی خاک و انجام تزریق در آن نیاز به محفظه‌ای استوانه‌ای با قطر حداقل ۳۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۳ بود. همچنین به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها در انتهای هر ستون ابتدا یک لایه اسکاچ (برای جلوگیری از به‌هم خوردن نمونه‌ها در هنگام تزریق) و روی آن ۱۵ میلی‌متر فیلتر قرار داده شد. سپس ماسه بااستفاده‌از قیفی که به آن لولهٔ شیشه‌ای به طول ۳۰ سانتی‌متر متصل شده بود در ستون جانمایی شد. در انتها مجددا یک لایه فیلتر و اسکاچ برای جلوگیری از به‌هم خوردن نمونه و بالای آن واشر لاستیکی (که سوراخی به‌قطر ٥ میلی‌متر، به‌منظور تزریق محلول، در وسط آن ایجاد شده بود) قرار گرفت. محلول‌ها توسط پمپ پرستالیک به مخزن بالای هر ستون منتقل شد. این کار به این دلیل انجام شد که اولا از آلودگی محلول جلوگیری به‌عمل آید و ثانیا محلول به‌آرامی وارد مخزن شود تا از محبوس شدن هوا داخل نمونه جلوگیری شود [۱۰].

## نتایج و یافته‌ها

مقدار نشست ناشی از بار یک محور ۸.۲ تنی در حالت الاستو پلاستیک در عمق‌های بهسازی مختلف از ۲۰ سانتی‌متر تا ٤٠ سانتی‌متر محاسبه شده و در شکل (٥) ارائه شده است. در این نمودار می‌توان دید در عمق ۲۰ سانتی‌متری از بستر راه بهسازی‌شده به‌روش بیولوژیکی مقدار نشست تقریبا 0.051 سانتی‌متر می‌باشد. باتوجه به این‌که بعد از عمق ۳٥ سانتی‌متر مقدار نشست بستر روسازی ثابت باقی می‌ماند بنابراین این عمق به‌عنوان عمق بهینهٔ بهسازی درنظر گرفته می‌شود.

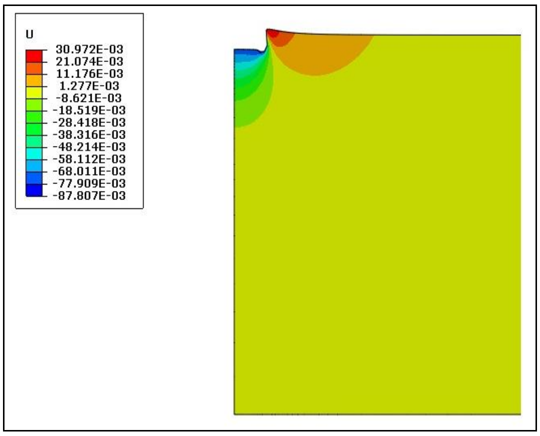



شکل ٥ مقایسهٔ نشست در مدت بارگذاری در عمق‌های مختلف خاک به‌سازی شده به‌روش بیولوژیکی

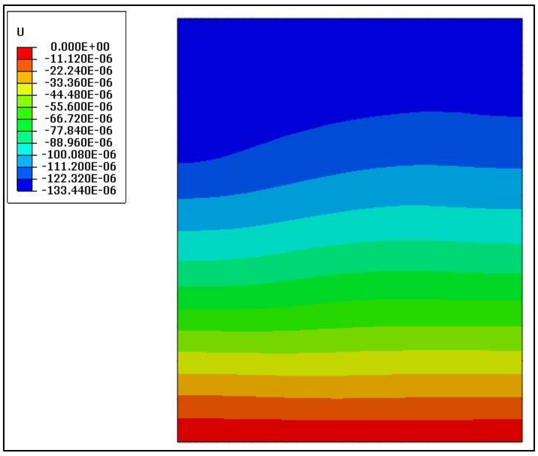
## مقایسهٔ نشست خاک بستر در عمق بهینه قبل و بعد از تثبیت خاک

باتوجه به شکل‌های (٦) و (٧) و نمودارهای به‌دست آمده از مدل‌سازی بستر راه، قبل و بعد از تثبیت خاک، می‌توان دید که تثبیت بیولوژیکی تأثیر قابل توجهی در کاهش نشست خاک داشته است. پارامتر U برروی نمودار مقادیر نشست را نشان می‌دهد.

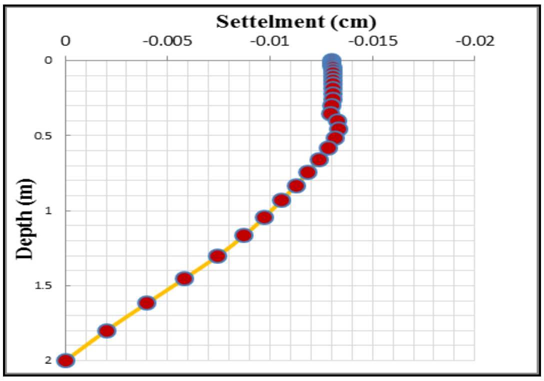
باتوجه به نمودار شکل (٨) نشست خاک در زیر مرکز بارگذاری قبل از تثبیت ٧,٥ سانتی‌متر می‌باشد. بعد از تثبیت در نمودار شکل (٩) این نشست در زیر مرکز بارگذاری به ٠,٠١٣ سانتی‌متر می‌رسد.



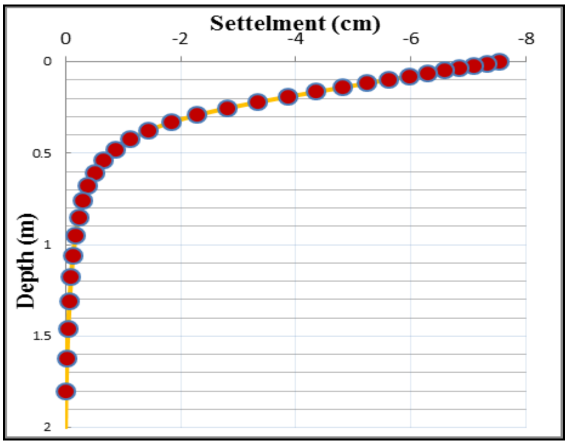

شکل ٦ تغییر شکل بستر خاک در عمق بهینه قبل از به‌سازی




شکل ٧ تغییر شکل بستر خاک در عمق بهینه بعد از به‌سازی




**شکل ٨** نمودار نشست در عمق بستر خاک بعد از به‌سازی




شکل ۹ نمودار نشست در عمق بستر خاک قبل از بهسازی

## تعیین تعداد تکرار مجاز بارگذاری بااستفاده‌از روابط فرمول‌های ارائه‌شده

در روسازی انعطاف‌پذیر سه مدل اصلی خرابی وجود دارد، این مدل‌ها عبارتند از: الف) مدل ترک خستگی، ب) مدل شیار گذاری، ج) مدل ترک حرارتی. در این مطالعات تنها مدل (ب) مطالعه شده است. در حالت (الف) خرابی در رویهٔ سازهٔ اصلی اتفاق افتاده است و نتیجهٔ کاهش عمر سازه به‌علت ایجاد تنش کششی در تارهای تحتانی لایه به‌خاطر تکرار بارهای وارد بوده است. در حالت (ب) خرابی ایجادشده در سازهٔ روسازی نتیجهٔ ایجاد تغییرشکل‌های قائم بیش از حد در بستر به‌علت تکرار این بارها بوده است [13].

در این بخش بااستفاده‌از روابط ارائه‌شده در جدول (۲) که مربوط به مؤسسهٔ انستیتو آسفالت ( Asphalt Institute) ، شل (Shell) ، ادارهٔ مرکز تحقیقاتی راه و ترابری انگلستان ( U.K. Transportation & Road Research) و آیین‌نامهٔ بلژیک ( Belgian Road Research Center) است، تعداد تکرار مجاز بارگذاری محور ۸,۲ تنی محاسبه شده است. تمامی این روابط مقدار شیارگذاری روی بستر روسازی را به‌وسیلهٔ کرنش فشاری ($\varepsilon_z$) روی این لایه محدود می‌نمایند [14]. از آنجایی که هدف ممانعت از ایجاد نشست و تغییر شکل پلاستیک در لایهٔ بستر می‌باشد، بنابراین حداکثر کرنش فشاری عمودی ($\varepsilon_z$) در این روابط معیار قرار می‌گیرد.

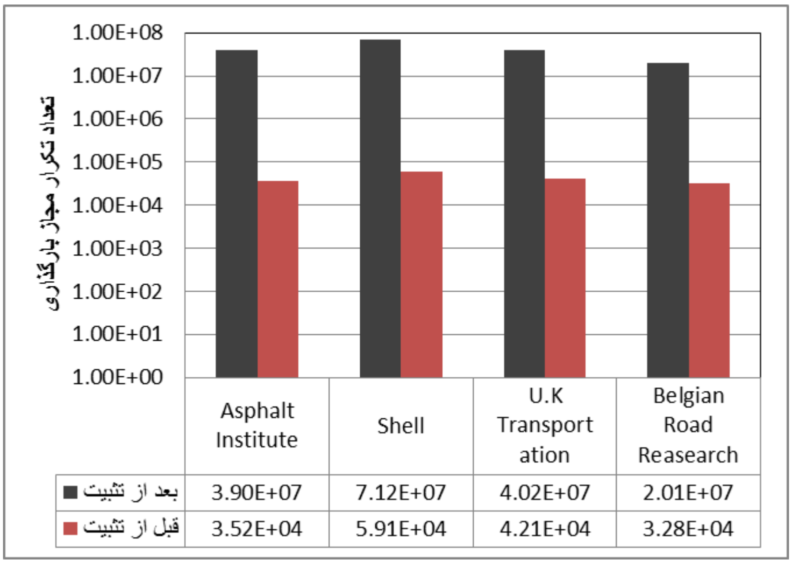
مقدار نشست زیر مرکز بارگذاری بااستفاده‌از مدل الاستو پلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. بااستفاده‌از روابطی که در جدول (۲) ارائه شده است تعداد تکرار مجاز بارگذاری تعیین می‌شود.

مقادیر کرنش فشاری عمودی در لحظهٔ گسیختگی در دو حالت بهسازی‌شده و بهسازی‌نشده روی سطح لایهٔ بستر محاسبه شده است. در حالت قبل از بهسازی کرنش عمودی لحظهٔ گسیختگی $101*10^{-5}$ و در حالت بعد از بهسازی این کرنش $9.641 * 10^{-6}$ به‌دست آمده است. استفاده از مدل‌های ارائه‌شده در جدول (۲) مقادیر تکرار مجاز بارگذاری مطابق شکل (۱۰) می‌باشد. باتوجه به مقادیر به‌دست آمده کرنش لحظهٔ گسیختگی قبل و بعد از بهسازی احتمال وقوع تغییرشکل‌های ماندگار کاهش یافته است. همچنین باتوجه به معیار خرابی شیارگذاری، تعداد تکرارهای مجاز بارگذاری افزایش می‌یابد که این امر در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. چنانچه تعداد ترافیک سال اول طرح یک روسازی مشخص باشد بااستفاده‌از تکرارهای به‌دست آمده می‌توان عمر لایهٔ بستر را درمقابل خرابی شیارشدگی برآورد نمود.

به‌طور کلی بااستفاده‌از بهسازی لایه‌های سست به‌روش بیولوژیکی سختی خاک افزایش، نشست خاک کاهش و درنتیجه پتانسیل شیارشدگی کم می‌شود.

جدول ۲ روابط تعیین تعداد تکرار مجاز بارگذاری (یانگ و هوانگ،۱۹۹۳)

| ارائه‌دهنده | روابط تعیین تعداد تکرار مجاز بارگذاری |
|---|---|
| مؤسسهٔ انستیتو آسفالت | $1.365\times10^{-9}(\varepsilon_z)^{-4.477}$ |
| مؤسسهٔ شل | $6.15\times10^{-7}(\varepsilon_z)^{-4}$ |
| مرکز تحقیقاتی راه و ترابری انگلستان | $6.18\times10^{-8}(\varepsilon_z)^{-3.95}$ |
| آییننامهٔ بلژیک | $3.05\times10^{-9}(\varepsilon_z)^{-4.35}$ |




شکل ۱۰ مقایسهٔ تعداد تکرار مجاز بارگذاری قبل و بعد از تثبیت خاک

## جمع‌بندی

میزان نشست خاک بستر راه قبل از به‌سازی در زیر مرکز بارگذاری (در مدل بهینه با عمق ۲متر)، ۷,۵ سانتی‌متر می‌باشد و بعد از تثبیت این نشست در زیر مرکز بارگذاری به ۰,۰۱۳ سانتی‌متر می‌رسد. این نتیجه گویای این موضوع است که خاک ماسه‌ای نرم به ماسه‌سنگ تبدیل شده است. بنابراین این روش در خاک‌های دانه‌ای سست برای بهبود خواص مکانیکی خاک، افزایش ظرفیت باربری، کنترل فرسایش و همچنین کاهش خطرات روانگرایی و پایداری شیب‌ها می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. باتوجه به این‌که عمق تزریق محلول باکتریایی در مقیاس بزرگ بسیار مهم است تا عمق به‌سازی‌شده یکنواخت و همگن باشد بنابراین به تعیین عمق مؤثر برای به‌سازی پرداختیم که عمق ۳۵ سانتی‌متر برای به‌سازی بسیار مناسب بود، زیرا نشست بستر در زیر مرکز بارگذاری بعد از این عمق به یک مقدار ثابت می‌رسد و برای جلوگیری از هزینه‌های اضافی در به‌سازی بیولوژیکی نیازی به تزریق محلول باکتریای بیش از این عمق نیست. از آنجایی که خاک‌های دانه‌ای ضریب نفوذپذیری بالایی دارند، محلول باکتریایی به‌راحتی و به‌صورت همگن در این نوع خاک‌ها نفوذ می‌کند. در بررسی‌های آزمایشگاهی نفوذ محلول باکتریایی در خاک‌های دانه‌ای مشاهده شده است [۱۰]. تعداد تکرار مجاز بارگذاری که با جای‌گذاری مقدار کرنش عمودی ($\varepsilon_z$) حاصل از بارگذاری اعمال شده روی بستر راه در دو حالت

به‌سازی‌شده و به‌سازی‌نشده در روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، انگلستان و بلژیک است نشان می‌دهد که این عدد بعد از به‌سازی ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌یابد و بیانگر افزایش قابل‌توجه عمر بستر به‌سازی شده می‌باشد. برای به‌دست آوردن عمر دقیق بستر روسازی تعداد ترافیک سال اول طرح روسازی باید مشخص باشد.

وقتی قسمتی از ماسهٔ شل بااستفاده‌از به‌سازی بیولوژیکی به ماسه‌سنگ تبدیل می‌شود، قسمت به‌سازی‌شده باعث تعدیل تنش‌های وارد به بستر راه می‌شود، بنابراین قسمتی از ماسهٔ شل که زیر قسمت به‌سازی شده است تنش‌های کمتری را تحمل خواهد کرد. همچنین یکی از دلایل ترک‌خوردگی آسفالت نشست‌های نامتقارن و گسیختگی خاک بستر می‌باشد که با به‌سازی بیولوژیکی بستر راه می‌توان از ترک‌خوردگی آسفالت جلوگیری نمود و درنتیجه عمر آسفالت افزایش می‌یابد.

## مراجع


1. Wiffin, V. V., "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiology Journal*, 24, PP. 417–423, (2007).
2. Erlich, H. L., "Geomicrobiology", Marcel Dekker. Inc., New York, (1981).
3. Erlich, H. L , "Geomicrobiology", Marcel Dekker. Inc., New York, (1996).
4. Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Ben Chekroun, K., Gonzalez-Muñoz, M.T., "Conservation Of Ornamental Stone By Myxococcus Xanthus-Induced Carbonate Biomineralization", Applied And Environmental Microbiology, 69(4), PP. 2182-2193, (2003).
5. Castanier, S., "Bacterial Role in Precipitation of Carbonate Minerals", Microbial Sediments, PP. 32 – 39, (2000).
6. Fujita, Y.T., "Stimulation of Microbial Urea Hydrolysis In Groundwater To", Sci. Technol, PP. 3025-3032, (2008).
7. Grant Ferris, F., "Calcite Precipitation and Trace Metal Partitionning in Groundwater And The Vadose Zone: Remediation Of Strontium-90 And Other Divalent Metals And Radionuclides In Arid Western Environments", USDOE Office of Environmental Management, Technical Report, University Of Toronto, (2003).
8. Ramachandran Sk., Ramakrishnan. V., "Remediation of Concrete Using Microorganisms", Aci Mat, pp. 3-9, (2001).
9. Hammes, F., "Calcium Removal from Industrial Wastewater by Bio–Catalytic CaCO3 Precipitation", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 78, 6, PP. 670-677, (2003).

۱۰. بدیعی، ح.، «به‌سازی خصوصیات مکانیکی خاک‌های دانه‌ای به‌وسیلهٔ سمنتاسیون بیولوژیک»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، (۱۳۹۰).

11. Lacey, G., Thenoux, G., and RodríguezRoa, F., "Three-Dimensional Imensional Finite Element Model for Flexible Pavement Analyses Based on Field Modulus Measurements", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 33, No. 1B, (2007)

۱۲. معاونت راهبردی دفتر ریاست جمهوری، آیین‌نامۀ روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریۀ ۲۳٤، تجدید نظر اول، (۱۳۹۰).

۱۳. فاروقی، ف.، امیری حسینی، ح.ر.، بامداد زیکساری، آ.، «تأثیر کیفیت میان‌لایۀ روسازی انعطاف‌پذیر بـرروی طـول عمـر سـازۀ روسـازی» چهارمین کنگرۀ ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت، (۱۳۸۷).

14. Huang, Y. H., "Pavement Analysis & Design", Englewood Cliffs, N.J, Prentice Hall, New Jersey, (1993).